

IPM type BLDC 전동기의 자속장벽 설치에 따른 코깅 토크 저감

양병렬<sup>1</sup>, 윤근영<sup>2</sup>, 권병일<sup>2</sup>  
 삼성전자<sup>1</sup>, 한양대학교<sup>2</sup>

Reducing the Cogging torque of IPM type BLDC Motor according to the Flux barrier shape

Byoung-yull Yang<sup>1</sup>, Keun-young Yun<sup>2</sup>, Byung-il Kwon<sup>2</sup>  
 Samsung Electronics<sup>1</sup>, Hanyang University<sup>2</sup>

**Abstract** - This paper describes an approach to design a interior permanent magnet motor(IPM motor) for the reduction of cogging torque. The magnitude of the torque ripple and cogging torque in a interior permanent magnet motor(IPM motor) are generally dependent on several major factors: the shape of stator tooth tip, slot opening width, air gap length, the shape of barrier preventing flux leakage of magnets, magnet configuration and magnetization distribution or magnet poles. In this paper, the IPM BLDC motor is designed considering a saturated leakag flux between the barriers on the rotor for increasing the efficiency and decreasing the magnitude of the cogging torque. Analytical model is developed for the IPM BLDC motor with a concentrated winding stator. The results verifies that the proposed design approach is very efficient and effective in reducing the cogging torque and the torque ripple of the IPM BLDC motor to be used in an electric vehicle.

1. 서 론

가전 분야 및 산업분야에서 사용되어지고 있는 BLDC 전동기는 단위체적당 에너지 밀도가 높아, 응용 분야가 확산되고 있는 추세이다[1]. 특히 저 용량의 가전기기 분야에서 빠른 속도로 전동기 사용량이 증가하고 있으며, 고 용량, 고효율 응용 분야에서 최근 적용분야가 증가 추세에 있다. 또한, 고속회전 및 저전압 고효율을 위한 BLDC 전동기가 활발히 연구되고 있는 추세이다. BLDC 전동기는 크게 회전자 표면에 영구자석을 부착하는 표면부착형과(SPM type BLDC motor), 회전자 내부에 영구자석을 삽입하는 매입형(IPM type BLDC motor)으로 구분할 수 있다. 표면부착형과 매입형은 기하학적인 차이뿐 아니라, 전동기의 동작 특성 및 전동기 응용분야에서 차이를 나타낸다. 특히 고속회전 및 고효율으로 사용할 경우 표면부착형 BLDC 전동기 보다는 매입형 BLDC 전동기를 사용하는 것이 효율 및 전동기의 안전성 면에서 우수하다. 고속 운전시 표면 부착형은 영구자석이 원심력에 의해 분리되는 경우가 발생되어 전동기가 파손될 수 있다. 영구자석 매입형 BLDC 전동기는 전동기 형상에 의하여 발생하는 릴럭턴스 토크에 의하여 표면부착형 BLDC 전동기 보다 효율이 높고, 영구자석이 회전자 내부에 존재하므로 고속 운전에도 영구자석이 분리되지 않는 장점을 가진다. 그러나 영구자석이 회전자 내부에 있으므로 회전자의 일정 부위에 자속선이 밀집되어 자속이 포화되고, 일정부위에 높은 잔류자속밀도에 의하여 코깅 토크가 표면부착형 전동기와 비교하여 높다는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 영구자석의 형상 변경, 자속 장벽(flux barrier) 설치 및 형상 변경 그리고 영구자석의 위치 변경 등의

방법으로 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 코깅토크 저감에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-5]. 그러나 자속 장벽에 관한 연구는 회전자의 자속 포화를 고려하지 않고 설계하므로, 설계시 해석 데이터와 전동기 제작에 의한 측정 데이터 사이에 오차를 가지는 경우가 발생된다.

본 논문은 전기 자동차의 구동용으로 사용 되고 있는 IPM type BLDC 전동기의 토크 리플 및 코깅 토크를 줄이기 위하여 자속 장벽을 설치하는 경우 회전자 내부의 자속 장벽 사이의 영구자석에 의해 자속이 포화되지 않도록 자속장벽의 위치를 최적 설계함으로써 전동기의 효율을 높이고, 코깅 토크를 감소시킴으로써 전동기의 토크 맥동을 감소시키고자 한다.

2. IPM type BLDC 전동기 형상 및 barrier 설계

2.1. 해석 모델

본 논문의 적용 모델은 그림 1과 같은 형상으로 전기 자동차의 구동용으로 사용되어지고 있는 DC 24V IPM type BLDC 전동기이다. 자동차용으로 사용되는 전동기는 저전압에서 구동되고, 고 토크를 발생 시켜야 하므로, 영구자석은 NdFeB 1.0[T]를 사용하였고, 권선방식은 4병렬 분포권으로 하였다. 그림 1과 같이 영구자석을 회전자 반지를 방향으로 위치시킴으로써 영구자석에 의한 릴럭턴스 토크가 일반적인 IPM BLDC 전동기와 비교하여 크게 나타나므로 효율 및 출력이 증가된다. 그러나 영구자석의 끝단-공극과 만나는 지점-에서 자속이 집중되어 진동과 소음의 원인이 되는 코깅 토크가 크게 발생된다. 코깅 토크를 감소시키기 위하여 고정자 권선이 분포권으로 되어 있으므로, 영구자석에 의한 공극 자속 밀도 분포를 정형적인 분포가 가능한 그림 1과 같이 회전자 내부에 자속 장벽이 설치되어 있는 전동기를 선택하였다. 회전자 내부에 위치한 자속 장벽은 영구자석 끝단에 자속선이 집중되는 것을 차단하고, 영구 자석에서 발생하는 자속선이 회전자 내부에 고르게 분포하도록 한다.

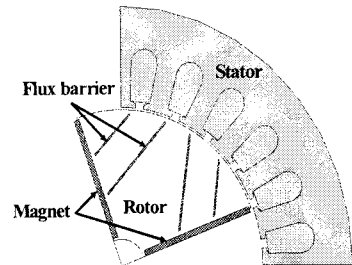


그림 1. IPM type BLDC 전동기 형상  
 Fig. 1 Cross-section of IPM type BLDC motor

## 2.2. Flux barrier 설계

영구자석에서 발생하는 자속을 회전자 내부에 고르게 분포시키기 위하여 그림 2와 같이 회전자 내부에 자속 장벽 설치한다. 공극과 근접한 자속 장벽의 위치는 영구자석과 공극이 만나는 곳을 기준으로, 그림 2와 같이 회전자 표면의 원주를 시계방향으로 region I, region II 그리고, region III의 거리 비를 각각 갖는 지점과, 영구자석과 근접한 자속 장벽의 끝단은 영구자석의 길이를 1/3등분하는 위치 점과 연결하여 자속장벽을 설치한다. 공극 부분의 region I, region II 그리고, region III의 크기의 비는 그림 3과 같이 길이 1의 정사각형의 면적에서 반지름은  $r$ , 중심점  $(a,a)$ 을 가지고  $x-y$ 축 좌표계  $(1,0)$  그리고  $(0,1)$ 를 지나는 부채꼴 면적의 공통 면적을 제외한 나머지 면적을  $x$ 축을 기준으로 설정된 구간을 적분한 값이 된다.

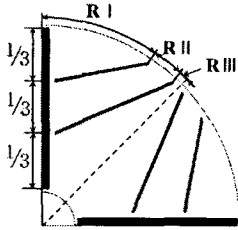


그림 2. 자속 장벽 위치 및 형상  
Fig. 2 Position of flux barrier and shape

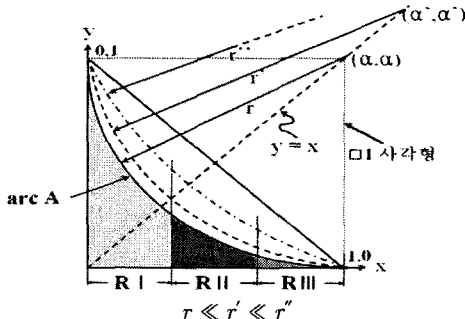


그림 3. region I, region II and region III의 도식  
Fig. 3 Schematic of region I, region II and region III

Arc A의 중심점은 식  $y=x$  선상에 놓여져 있고, arc A의 방정식은 다음과 식(1),(2)와 같다.

$$(x-a)^2 + (y-a)^2 = r^2 \quad (1)$$

$$y = a + \sqrt{1-2a - (x-a)^2} \quad (2)$$

여기서,  $r$ 은 호의 중심점과 호사이의 반지름이고,  $x$ 의 영역은  $0 \leq x \leq 1$ 이며,  $y$ 의 영역은  $0 \leq y \leq 1$ 이다. 또한  $(a,a)$ 는 호의 중심점 좌표이다. 식 (1)과 식(2)를 이용하여 region I, region II 그리고 region III의 면적 식을 구하면 다음과 같다.

$$\text{region I} : \int_0^{\delta/3} [a + \sqrt{1-2a - (x-a)^2}] dx \quad (3)$$

$$\text{region II} : \int_{\delta/3}^{\zeta/3} [a + \sqrt{1-2a - (x-a)^2}] dx \quad (4)$$

$$\text{region III} : \int_{\zeta/3}^1 [a + \sqrt{1-2a - (x-a)^2}] dx \quad (5)$$

여기서,  $\delta/3$ 은 region I와 region II의 경계를 나타내고,  $\zeta/3$ 은 region II와 region III의 경계를 나타낸다. 본 논문에서  $\delta=1$ ,  $\zeta=2$ 로 설정한다.

## 3. 특성해석

호의 반지름이 임의 적으로 변할 때,  $x$ 축을 기준으로 3등분한 경우( $\delta=1$ ,  $\zeta=2$ ) region I, region II 그리고, region III의 면적에 대한 면적 비와 면적 비를 적용하여 자속 장벽을 설계한 모델의 코깅 토크의 FEM 해석 값은 다음 표 1과 같다.

표 1. 호의 반지름에 따른 면적 비와 면적비를 적용한 모델의 코깅 토크(%)

반지름	region I	region II	region III	Cogging torque
$\infty$	55.6	33.3	11.1	1.043
5.99	57.3	32.3	10.3	1.023
3.15	59.4	31.0	9.6	1.050
2.24	61.2	30.0	8.8	1.054
1.78	63.4	28.6	8.0	0.967
1.50	65.8	27.1	7.2	0.936
1.31	68.4	25.3	6.3	0.888
1.18	71.3	23.3	5.4	0.764
1.07	74.5	21.1	4.4	0.639
0.98	78.1	18.6	3.3	0.607
Original Model	75.2	21.9	2.9	0.971

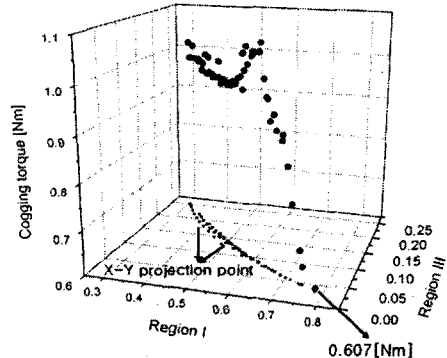


그림 4. 면적 비에 따른 코깅 토크 값(peak-peak)  
Fig.4 Magnitude of the cogging torque

표 1과 그림 4로부터 기존 모델의 코깅 토크는 0.971[Nm]이고, 개선 후 모델은 0.607[Nm]이다. region I이 증가하고, region II와 region III가 감소함에 따라 코깅 토크가 감소함을 알 수 있다. 그러나 반지름 3.15와 반지름 2.24일 때 코깅 토크가 증가하게 되는데 이러한 이유는 면적비를 적용한 자속 장벽 설치시 장벽 사이의 길이가 고정자의 1개의 치 보다 길고, 1개의 치와 1슬롯 합이 길이가 보다 작아 이차적인 코깅 토크가 발생되어 코깅 토크가 증가하게 된다. 또한 자속 장벽 사이의 자속이 포화되는 것을 판단하기 위하여 자속 장벽 사이의 자속밀도를 해석한다.

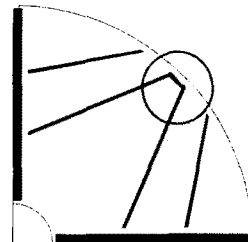


그림 5. Barrier 사이의 자속밀도 계산 위치  
Fig. 5 Position of calculation of the flux density

그림 5는 자속 밀도 계산 위치이며, 그림 6은 자속 장벽사이의 자속 밀도 값이다. 그림 6에서 기존 모델은 평균 자속 밀도 값이 1.949[T]이고, 개선 모델의 평균 자속 밀도 값은 1.836[T]이다.

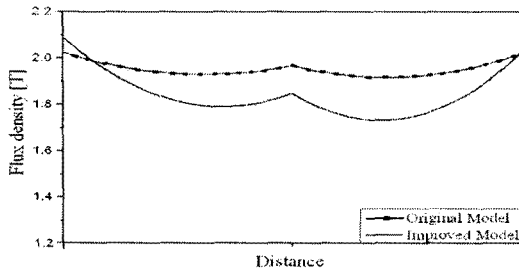


그림 6. Barrier 사이의 자속밀도 분포 곡선  
Fig. 6 Plot of the flux density in between barriers

그림 7은 기존 전동기와 개선 후 전동기의 코깅 토크 해석 결과이며, 그림 8은 코깅 토크 해석 결과를 주파수 분석한 결과이다. 그림 7로부터 개선 전 모델의 코깅 토크의 peak-peak 값이 0.97[Nm]이고, 자속 장벽을 재설계한 개선 후 모델의 코깅 토크의 peak-peak 값은 0.60 [Nm]로 37.5% 감소했다. 그림 8로부터 코깅 토크 주파수 성분 중 7고조파까지의 저고조파 성분이 크게 감소하였다. 특히 2고조파 성분에서 개선 전 0.42[Nm]에서 개선 후 0.24[Nm]로 42.9% 감소하였다.

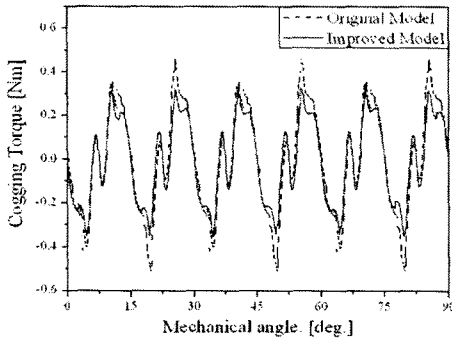


그림 7. 코깅 토크 곡선  
Fig. 7 Plot of the cogging torque of the original model and the improved model

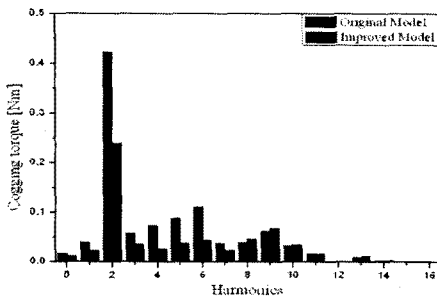


그림 8. 코깅 토크 고조파 분석  
Fig. 8 Harmonics spectra of the cogging torque

그림 10과 그림 11은 해석 모델의 토크 특성 곡선 및 고조파 분석한 결과이다. 개선 전 모델의 효율은 79.5%이고, 개선 후 효율은 84.8%이다. 개선 전 평균 토크는 1.41[Nm]이고, 개선 후 평균 토크는 1.07[Nm]이다.

토크 특성 결과로부터 코깅 토크를 저감하기 위하여 자속 장벽을 재설계함으로써 코깅 토크의 크기는 크게 감소하였으나 전동기의 운전 토크 또한 크게 감소함을 알 수 있다. 전동기의 운전 토크는 전동기의 전류와 영구자석에 의한 토크와 전동기의 Core 형상과 영구자석에 의한 코깅 토크가 존재한다. 그러므로 본 논문에서 코깅 토크를 크게 감소시킴으로써 운전 토크 또한 코깅 토크의 감소량만큼 감소하게 되었다.

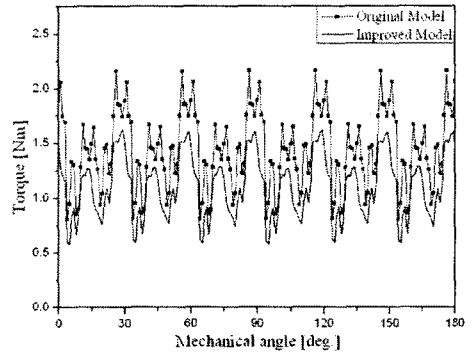


그림 9. 토크 곡선(speed : 3000rpm)  
Fig. 9 Plot of the torque of the original model and the improved model

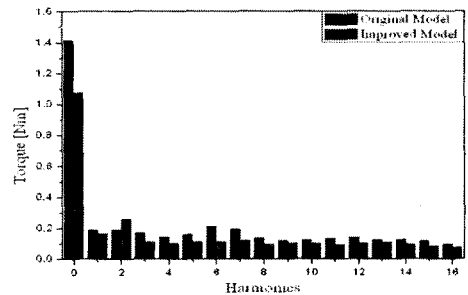


그림 10. 토크 고조파 분석  
Fig. 10 Harmonics spectra of the torque

#### 4. 결 론

본 논문은 전기자동차의 구동용으로 사용되는 저전압 고폭용 IPM type BLDC 전동기의 회전자에 자속 장벽을 재설계함으로써 코깅 토크를 저감하였다. 또한 자속 장벽 사이에 자속이 포화되어 전동기의 효율이 감소되는 것을 방지하기 위하여 자속 장벽사이의 평균 자속 밀도를 전동기의 전기 강판(S60)이 포함 할 수 있는 양으로 제한하여 자속 장벽을 설계하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] S.I. Kim, J.Y. Lee, Y.K. Kim, and J.P. Hong, "Optimization for reduction of torque ripple in interior permanent magnet motor by using Taguchi method", 2004CEFC, 2004.
- [2] W.Y. Fowlkes et al, *Engineering Methods for Robust Product Design*, Addison-Wesley, 1995.
- [3] 박정우, 구대현외, 전기 자동차용 바퀴일체형 전동기 및 제어기 개발, 한국전기연구원 보고서, 1998
- [4] T.J.E Miller, *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, Clarendon Press, Oxford 1993
- [5] S.A.Nasar, I. Boldea, L.E.Unnewehr, *Permanent Magnet, Reluctance, and Self-Synchronous Motors*.CRC Press 1993